

Sistema Operativo de Análisis y Predicción Numérica (LAM) en el Instituto Nacional de Meteorología

ROSARIO DÍAZ-PABÓN y BARTOLOMÉ ORFILA
Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

1. INTRODUCCION

La invención del barómetro por Torricelli, en 1643, marca el hito a partir del cual la Meteorología empieza a considerarse Ciencia, si bien transcurrieron casi dos siglos hasta que se estableció, mediante los mapas sinópticos, una correspondencia entre las condiciones atmosféricas reinantes y la distribución espacial de la presión atmosférica en el suelo.

La invención del telégrafo, en 1845, facilitó que el intercambio de las observaciones, efectuadas en distintos puntos a la misma hora, fuera más rápido y que los mapas sinópticos estuvieran disponibles en tiempo útil para la realización de predicciones.

Bjerknes, en 1904, estableció la base de la moderna predicción numérica del tiempo, al considerar que la evolución del estado de la atmósfera es, básicamente, un problema matemático de valores iniciales y condiciones de contorno, cuyas ecuaciones se considera describen la termodinámica e hidrodinámica de la atmósfera y cuya resolución permite conocer el estado futuro de la atmósfera, a partir de un estado inicial.

La no linealidad de las ecuaciones con la correspondiente no existencia de soluciones analíticas lleva a la necesidad de abordar el problema mediante modelos numéricos aplicados a campos meteorológicos previamente discretizados, utilizando habitualmente alguna de las siguientes técnicas:

- 1.—Diferencias finitas.
- 2.—Espectral.
- 3.—Elementos finitos.

En la primera de ellas, los campos meteorológicos que se pretende predecir se representan por sus valores en una serie de puntos, regularmente distribuidos en el espacio (rejilla de predicción), y las derivadas se aproximan mediante combinaciones lineales de estos valores.

En la segunda, los campos meteorológicos se representan como combinación lineal de un conjunto finito de funciones básicas ortogonales conocidas, siendo los coeficientes de dicha combinación lineal las incógnitas de las ecuaciones analíticas resultantes. En este caso, las derivadas se efectúan de forma exacta, puesto que se conocen las derivadas de funciones básicas.

En la tercera, que participa de las dos anteriores, los campos meteorológicos se representan también como combinación lineal de un conjunto finito de funciones básicas pero, a diferencia de la técnica espectral, estas funciones son no nulas sólo sobre un dominio acotado del área de definición, lo cual elimina dificultades de la técnica espectral, provenientes del carácter no local de las funciones básicas de ésta. En contrapartida, las funciones básicas del método de los elementos finitos no son ortogonales, lo que introduce dificultades a la hora de resolver las ecuaciones.

Tras los aparentes fracasos de Richardson en el primer intento publicado de predecir numéricamente el comportamiento de la atmósfera, hay que esperar al decenio 1960/70 en que los ordenadores electrónicos son herramienta habitual de los Servicios meteorológicos, para que se sistematice en éstos la preparación de predicciones numéricas. Esta sistemática, en la que se basan los actuales sistemas operativos de análisis y predicción, se realiza a partir de una serie de pasos que se ejecutan automáticamente en el ordenador, que se inician en la recogida de los datos de observación del Sistema Mundial de Telecomunicaciones (SMT), y que culminan en la distribución a los usuarios de los productos operativos, y comprenden:

- La obtención de datos de los circuitos de telecomunicaciones.
- El procesamiento previo de observaciones y campos.
- La asimilación de datos y la inicialización.
- La predicción.
- El postproceso.
- El archivo de datos y campos.
- La predicción estadística.
- La verificación.
- La distribución de productos.

El Instituto Nacional de Meteorología inició en 1967 sus actividades de Predicción numérica (Medina, 1979; Orfila, 1979; Hortal, 1979). A partir de septiembre de 1985 comenzó a operar en el ordenador Fujitsu Facom M-382 el actual sistema operativo de análisis y predicción, cuyos módulos resumidos en las figuras 1 y 2 se describen a continuación.

2. MODELO DE PREDICCIÓN (LAM)

El modelo operativo de predicción LAM es una versión para área limitada, con mayor resolución, del modelo de predicción de puntos de rejilla del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF), que fue el modelo operativo en este Centro desde 1979 hasta 1983 (Haseler, 1979).

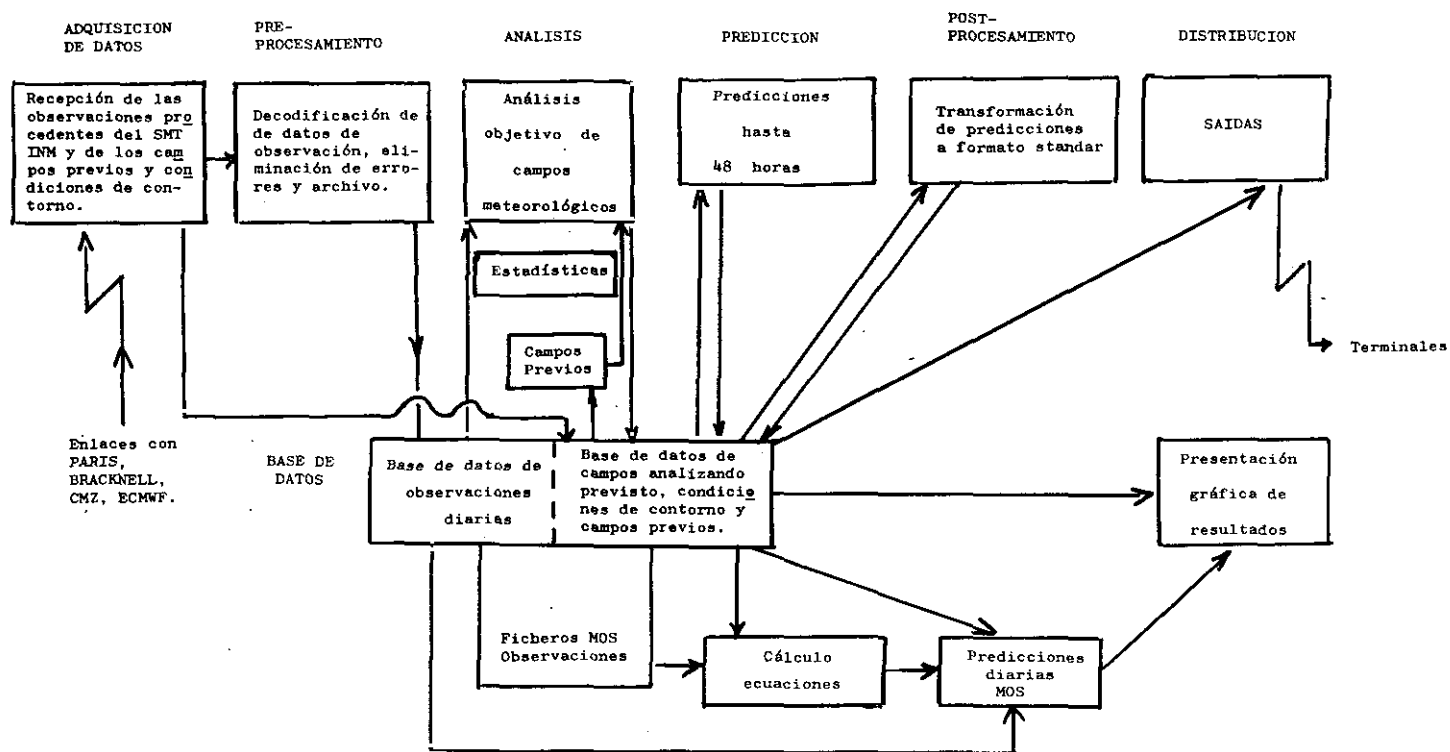


Figura 1. -Representación simplificada de la cadena operativa.

ESQUEMA OPERATIVO DEL LAM(INM)

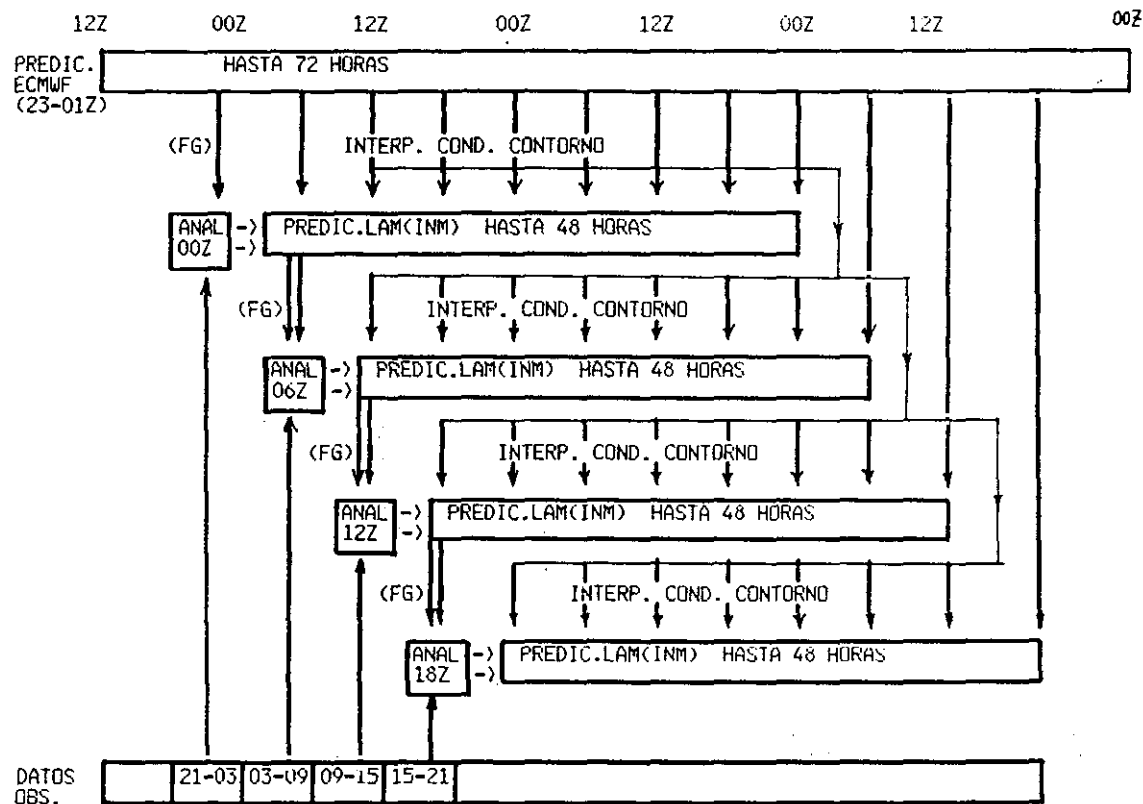


Figura 2.—Representación de los datos que alimentan el LAM (INM).

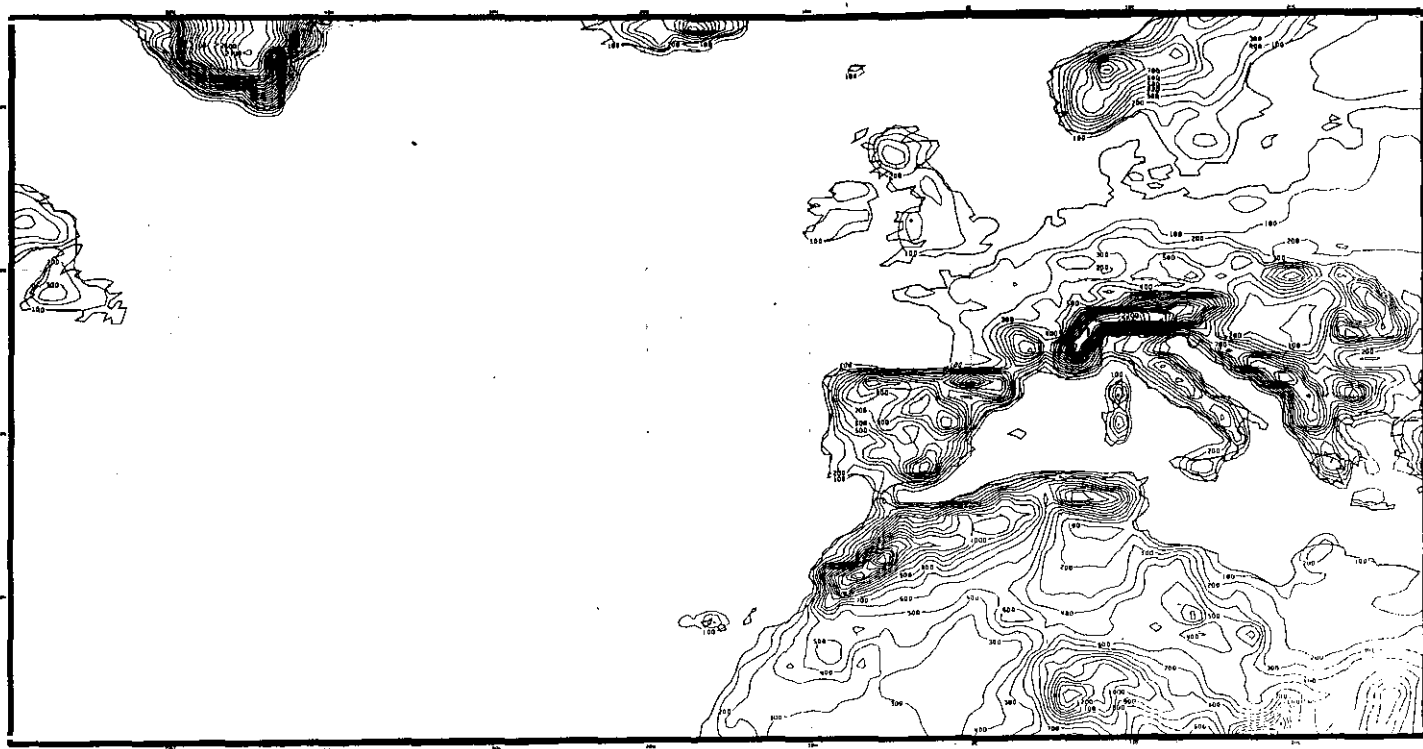


Figura 3.—Area y orografía del LAM (INM).

Las ecuaciones de evolución de la atmósfera, en la forma en que se utilizan en el modelo, se incluyen en el apéndice I. En ellas, u y v son las componentes meridiana y zonal del viento, respectivamente; T la temperatura; q la humedad específica; p_s la presión al nivel del suelo del modelo, Φ el geopotencial o energía potencial por unidad de masa; y R la constante de los gases. Las ecuaciones utilizan como variables espaciales horizontales la longitud λ y la latitud θ geográficas y como coordenada vertical la llamada coordenada sigma σ o presión normalizada con la presión en superficie.

El área sobre la que se efectúa la predicción operativa en el I.N.M. viene representada en la Fig. 3, en la cual se ha dibujado también la orografía, tal como está representada en el modelo (orografía promediada a partir de datos globales con 10' de resolución). La predicción se efectúa sólo hasta 48 horas, ya que al ser un área limitada, que no cubre todo el globo, las condiciones atmosféricas existentes fuera de ese área no pueden ser tenidas en cuenta, y sin embargo, influyen dentro del área, al transcurrir el periodo de predicción. Para paliar, hasta cierto punto, esa falta de información desde el exterior del área, se utilizan como condiciones de contorno, es decir, como valores en los puntos más externos de la rejilla en que se han discretizado, las predicciones efectuadas con otro modelo que cubre todo el globo, aunque con menor resolución horizontal, como es el del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (Gimeno, 1985). A estas condiciones de contorno se les aplica un esquema de relajación que combina los valores previstos con valores prescritos en una banda de 8 puntos de rejilla en la frontera (Esquema de Davies-Källberg, 1976).

La integración temporal se realiza utilizando el método «leapfrog» semimplicito con un paso de tiempo de 7,5 minutos. Este se ha elegido de tal forma que evite la aparición de inestabilidades computacionales.

El modelo utiliza la técnica de discretización de las diferencias finitas centradas en el espacio, con una distancia entre puntos de rejilla de unos 75 km; esta técnica conserva la enstrofia potencial absoluta, la masa y la energía sobre un área global.

Al hacer la discretización horizontal, no todas las variables se evalúan en los mismos puntos de rejilla (véase fig. 4). Esta rejilla, denominada tipo C de Arakawa, se ha seleccionado por sus buenas propiedades de dispersión para las ondas gravitatorio-inerciales, ya que simula de forma muy precisa el proceso de ajuste geostrófico. Además, este tipo de rejilla evita el ruido computacional de longitud de onda, doble que el ancho de la rejilla, en los términos que gobiernan el movimiento de las ondas gravitatorias puras.

Las variables se disponen en la vertical, distribuidas en los niveles sigma y en los niveles sigma intermedios (véase fig. 5). Los niveles no están repartidos de forma uniforme, para poder dar cuenta de la gran variación de las magnitudes atmosféricas en la vertical. Por ejemplo, en las proximidades del suelo se necesita representar la transición entre la región turbulenta próxima a la superficie (capa límite) y la atmósfera libre. Los valores de la

coordenada vertical sigma correspondientes a los 15 niveles en los que se discretiza la atmósfera son:

Nivel	Coordenada sigma	Altura aproximada (m)	
1	0,025	27.500	} estratosfera
2	0,076	17.880	
3	0,131	14.430	
4	0,192	12.000	
5	0,260	10.110	
6	0,334	8.415	
7	0,414	6.920	} capa límite
8	0,500	5.585	
9	0,588	4.375	
10	0,678	3.280	
11	0,765	2.290	
12	0,845	1.500	
13	0,914	830	
14	0,966	300	
15	0,995	40	

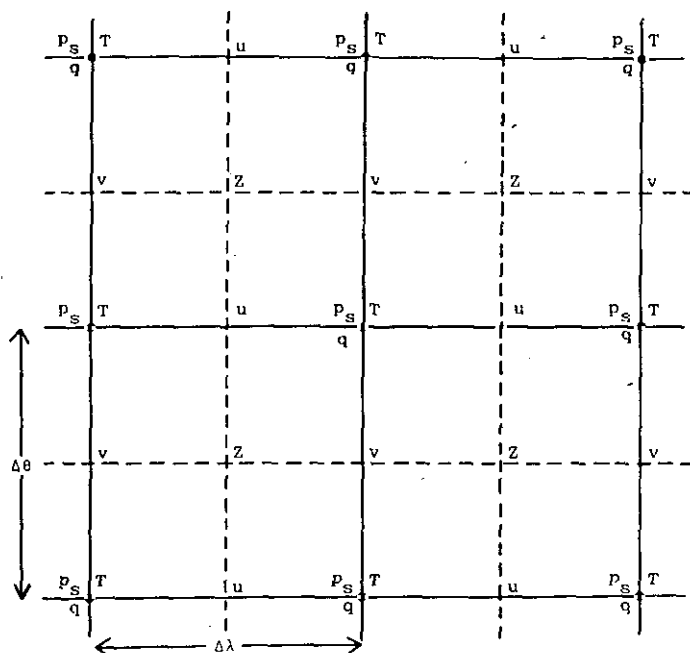


Figura 4.—Discretización horizontal en el modelo de predicción LAM (INM):
Rejilla tipo C de Arakawa.

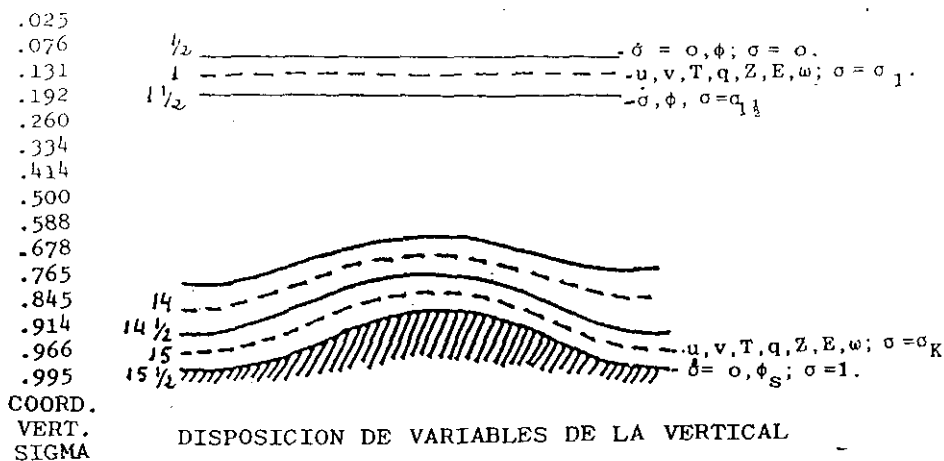


Figura 5.—Discretización vertical en el modelo de predicción LAM (INM): Distribución vertical de los 15 niveles del modelo.

Cualquier movimiento de la atmósfera que tenga una escala inferior al tamaño de la rejilla será ignorado por el modelo. Por otra parte, existen fenómenos, tales como la radiación, la evaporación, etc., que están incluidos en los segundos miembros de las ecuaciones, llamados términos fuente, que no están representados de forma explícita. Todos estos aspectos deben ser incluidos de alguna forma en la resolución de las ecuaciones, ya que realmente influyen en las escalas de movimiento que se desea predecir. La forma en que se introducen estos términos se denomina parametrización y es objeto del mayor esfuerzo de investigación en predicción numérica.

Los procesos físicos parametrizados en el LAM comprenden la difusión horizontal y vertical, los flujos superficiales de momento, calor y humedad, la precipitación a gran escala, la convección y la radiación, según se esquematiza en la fig. 6.

En el LAM la capa límite atmosférica se representa sólo por 3 o 4 niveles del modelo. En consecuencia, los gradientes verticales de temperatura, viento, humedad, etc., en la capa límite no pueden describir de forma satisfactoria los flujos turbulentos de momento, calor y humedad; de ahí la necesidad de parametrizar los flujos turbulentos en función de los parámetros a gran escala de la atmósfera, lo cual se lleva a cabo en base a la teoría de la similaridad de Monin-Obukov, en la que los perfiles de viento y temperatura dependen de parámetros externos y de flujos superficiales de momento y calor. Las expresiones para los flujos superficiales de momento, calor sensible y humedad que se utilizan en el modelo corresponden a expresiones analíticas distintas, según se trate de capa superficial estratificada estable o inestable. Los flujos, por encima de la capa superficial, se calculan basándose en la teoría de la longitud de mezcla. El coeficiente de difusión depende de la cizalladura del viento y de la estabilidad con longitud de mezcla asintótica de 150 m.

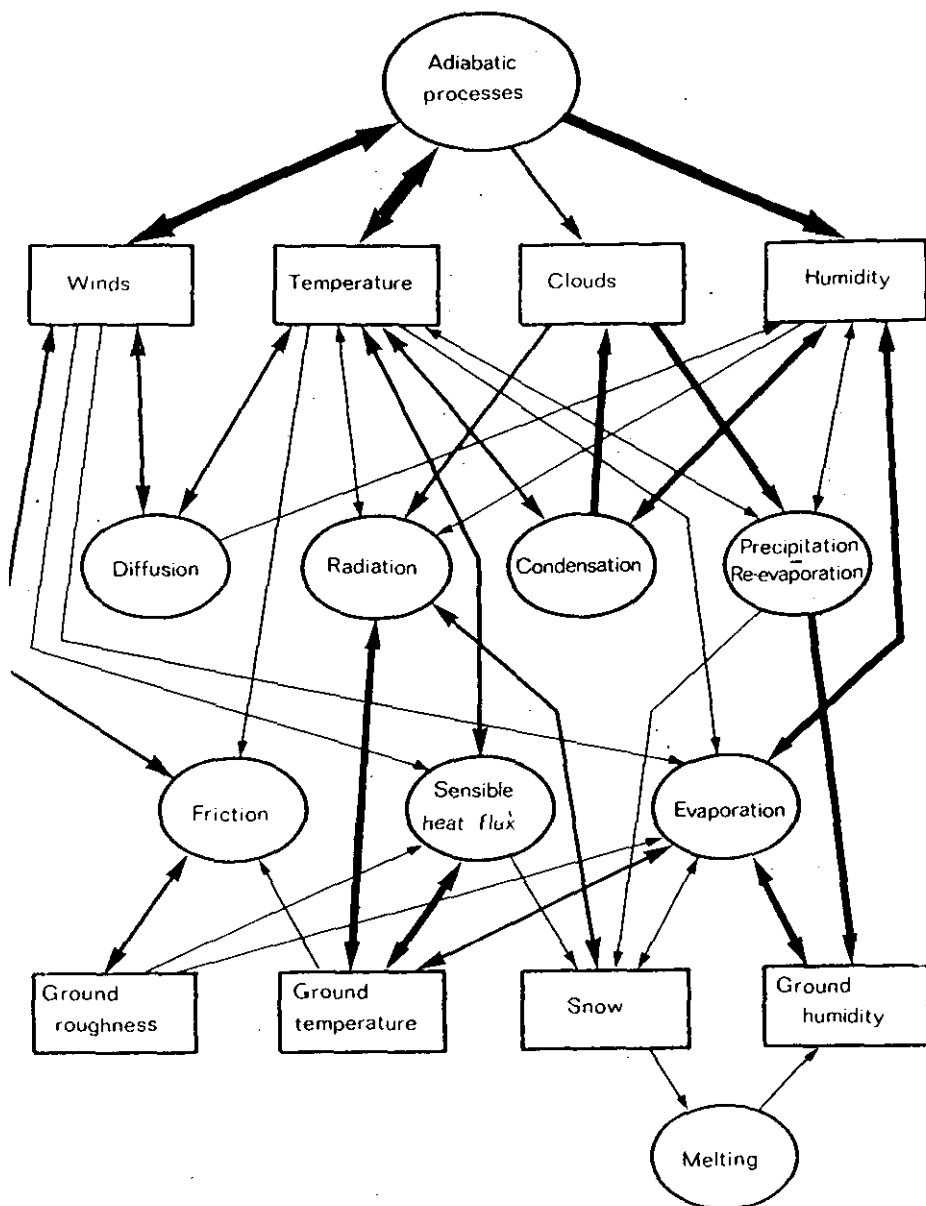


Figura 6.—Schematic representation of the processes included in the ECMWF model.

Para la modelación de los procesos de condensación a gran escala se parte de que la condensación a gran escala tiene lugar siempre que la humedad supere el valor de saturación y que el agua condensada cae instantáneamente

como precipitación. Se tiene en cuenta también la evaporación de la lluvia cuando cae a través de capas no saturadas.

La parametrización de los procesos convectivos se basa en el esquema de Kuo (1974), en el que se supone que las nubes de tipo cúmulo están forzadas por la convergencia media en niveles bajos en regiones de estratificación condicionalmente inestable. La producción de aire de nube es proporcional a la cantidad neta de convergencia de humedad en una columna correspondiente a un punto de rejilla más el suministro de humedad debido a evaporación superficial.

Se introduce un parámetro β (Kuo, 1974), de tal forma que la fracción $1 - \beta$ se condensa, mientras que β se almacena en la atmósfera. La elección de β (Anthes, 1977), depende de la humedad relativa media de la columna.

La parametrización de la radiación es muy compleja, debido a los muchos factores que influyen en este proceso y a su naturaleza altamente no lineal. Los procesos de radiación no influyen mucho en los resultados de modelos como el LAM, que se integran sólo hasta 48 horas; su efecto es mucho menor que el de otros procesos físicos. La influencia de la radiación apenas se nota en los niveles altos y medios del modelo, y se hace patente en la superficie y en los niveles próximos a ésta, permitiendo la simulación del ciclo diurno de temperatura.

La radiación en el modelo del INM se parametriza siguiendo el esquema simplificado desarrollado por Nordeng (1986). Las ondas largas y cortas se tratan de forma separada. En la radiación de onda larga los materiales absorbentes y emisores son el vapor de agua, el agua líquida y el dióxido de carbono (concentración constante). Se utiliza la aproximación de la emisividad para resolver las ecuaciones de transferencia radiativa. La función de emisividad se determina empíricamente y depende del dióxido de carbono y del vapor de agua. La nubosidad se utiliza en el esquema de radiación y se determina mediante diagnóstico por medio de funciones de la humedad relativa. En la radiación de onda corta se tienen en cuenta la dispersión por moléculas de aire y por nubes y la absorción del vapor de agua. Se incluye una variación diurna adecuada en la radiación de onda corta.

3. ASIMILACION DE DATOS E INICIALIZACION

Las condiciones iniciales de cada una de las cuatro integraciones diarias que se realizan en el modelo de predicción del INM, a las 00, 06, 12 y 18 horas TU, se calculan a partir de las observaciones meteorológicas disponibles en un entorno horario de tres horas respecto a ellas y a la estimación de los valores de los campos meteorológicos a analizar obtenidos a partir de una predicción anterior. El proceso de interpolación se lleva a cabo mediante un modelo objetivo de análisis de campos meteorológicos, denominado también de asimilación de datos, y es seguido por un modelo de inicialización que recalcula los campos analizados y que persigue mantener reducidas las ondas de tipo gravitatorio inercial que se producen como consecuencia de los

errores de observación y del método de interpolación utilizado. Dichas ondas, que se ponen de manifiesto en las predicciones obtenidas en las 6 u 8 primeras horas de integración de un modelo de ecuaciones primitivas, perturban y hacen inaplicables los resultados de no establecerse dicho esquema corrector.

3.1. Observaciones y campos previos

Las observaciones disponibles para la preparación de los análisis provienen en su mayor parte del Sistema Mundial de Observación del Programa de la Vigilancia Mundial de la O.M.M. (Organización Meteorológica Mundial).

El sector espacial del mismo proporciona tanto los partes SATEM, en los que se contienen los espesores de geopotencial entre diversos niveles tipo y el contenido de agua precipitable obtenidos a partir de los dos satélites TIROS en órbita polar, como los partes SATOB, que proporcionan el viento medido a partir del movimiento de las nubes observadas desde una red de satélites geoestacionarios

El sector terrestre del sistema de observación proporciona los partes SYNOP, SHIP, TEMP, PILOT y AIREP, con los que se transmiten codificadas las observaciones sinópticas en tierra, a bordo de buques, las observaciones procedentes de radiosondeos, las observaciones de viento realizadas a partir de globos pilotos y las observaciones medidas por las aeronaves, respectivamente.

Todas ellas se transmiten por el Sistema Mundial de Telecomunicaciones de la O.M.M. y están disponibles alrededor de dos horas y media después del momento nominal del análisis.

Cuando como campos previos se utilizan los del ECMWF, su disponibilidad queda asegurada mediante el enlace punto a punto entre los sistemas de ordenadores del ECMWF y el INM.

3.2. Análisis objetivo

El análisis objetivo de geopotencial se basa en el llamado método de interpolación óptima tridimensional multivariante de las discrepancias entre los campos previos y las observaciones (Gustafsson, 1979). Cada una de dichas discrepancias influye en la modificación de los valores del campo previo en los puntos de rejilla que distan de la posición de la observación menos que una distancia preestablecida (radio de influencia), mediante un factor que se determina por resolución de un sistema de ecuaciones lineales, cuyos coeficientes dependen de la distancia entre las observaciones y los puntos de rejilla, del error inherente al tipo de observación y del error de predicción del campo previo establecido a partir de estadísticas obtenidas de series históricas del modelo.

En zonas sin datos, por tanto, el campo analizado es el campo previo, y cuanto mejor sea el mismo, mejor será el análisis. Como campos previos se seleccionan las predicciones a 12 horas del ECMWF para iniciar el análisis correspondiente a las 00 Z, y las predicciones a 6 horas del modelo LAM para los tres ciclos restantes (Díaz-Pabón, 1988).

Las observaciones que influyen en el análisis de masas son la presión en superficie de los partes SYNOP, los geopotenciales de niveles estándar de los partes TEMP y los espesores de los partes SATEM.

Mediante la misma técnica se analizan los campos de temperatura utilizando como campos previos los deducidos a partir de los análisis de geopotencial mediante la ecuación hidrostática. Las observaciones que influyen en este análisis son las temperaturas de los niveles estándar de los partes TEMP.

De idéntica forma se analizan las componentes zonal (u) y meridiana (v) del viento utilizando los campos previos correspondientes con el mismo criterio que en el análisis de masas y a partir de los vientos observados en los partes TEMP, AIREP y SATOB.

Una vez analizado el viento, se efectúa un ajuste con la ecuación del viento del gradiente entre los campos de viento y de masas, obligando a ajustarse más al campo, en cuyo análisis haya intervenido menor número de observaciones en el área de que se trate.

Por último se analiza la humedad relativa en los seis niveles inferiores, usando las observaciones de depresión del punto de rocío de los partes TEMP y el contenido de agua precipitable de los partes SATEM.

3.3. Inicialización

En la atmósfera real existe un sutil equilibrio entre los campos de viento y de presión que asegura que las ondas gravitatorias tengan una amplitud mucho menor que la parte rotacional lenta del fluido. Si este equilibrio se rompe, aunque sólo sea ligeramente, aparece el mecanismo del ajuste geostrófico para restaurarlo, que mediante la excitación de ondas gravitatorio-inerciales recupera la situación de equilibrio.

El proceso, conocido como inicialización tiene como fin redefinir los campos iniciales, de tal forma que las ondas gravitatorio-inerciales permanezcan pequeñas a lo largo del período de predicción.

El sistema de predicciones del INM incorpora como esquema de inicialización el de las derivadas acotadas (Bijlsma and Hafkenscheid, 1986). Este esquema, esencialmente similar al de inicialización por modos normales, se basa en la descomposición del estado inicial analizado en modos verticales y en la resolución de dos ecuaciones de diagnóstico para cada modo vertical.

3.4. Interpolación vertical por incrementos

Se efectúa finalmente una interpolación vertical desde los 10 niveles de presión analizados entre 1.000 y 100 hectopascales a los niveles que utiliza el

modelo de predicción y una transformación de las variables analizadas (geopotenciales, vientos y humedades relativas) a las que utilizan las ecuaciones del modelo de predicción (temperatura, presión en el suelo del modelo, vientos y razones de mezcla del vapor de agua). La técnica utilizada es la de interpolación por incrementos.

4. POSTPROCESAMIENTO, VERIFICACION, PRESENTACION Y ARCHIVO

Cada doce pasos de tiempo el modelo de predicción avanza tres horas en la integración. Se archivan entonces los campos obtenidos en ficheros en línea y se somete un programa de postprocesamiento que se ejecuta en paralelo con la continuación de la predicción. Los resultados intermedios de las predicciones, cada tres horas, quedan así archivados en coordenadas σ entre dos predicciones consecutivas. Cada seis horas, también, los resultados se interpolan en la vertical a los niveles de presión estándar y se calculan en ellos las variables geopotencial, viento, temperatura y humedad a partir de las variables del modelo, archivándose temporalmente durante tres días estos resultados en disco.

Además, el programa de postprocesamiento lleva a cabo, al iniciar cada predicción, la verificación de las predicciones de horas anteriores válidas para el instante del análisis que se acaba de efectuar.

Dicha verificación tiene lugar sobre un área que se extiende entre 19,96°W a 11,89°E y de 30,10°N a 49,21°N, y calcula, para cada campo analizado y conjunto de predicciones asociadas a él, los parámetros siguientes:

- Error medio.
- Error cuadrático medio.
- Desviación típica del error de predicción.
- Coeficiente de correlación de tendencias.
- Coeficiente de correlación absoluto.
- Índice de gradientes.

En los apéndices II-a/b se muestra una selección de tablas que contienen las verificaciones correspondientes al año 1989.

La presentación y distribución de resultados a los usuarios se lleva a cabo, por una parte, mediante una salida gráfica en papel, una vez finalizados los análisis y las predicciones a 24 y 48 horas y, por otra parte, transfiriendo los campos analizados y previstos al sistema interactivo SAIDAS, al que se tiene acceso desde diversos terminales, tanto en Madrid como en otros Centros de predicción del INM, y que facilita la rápida y cómoda presentación en imágenes fijas o en secuencia de los campos del modelo y otros campos derivados.

La Tabla I resume los tiempos de proceso de los diferentes módulos y los elementos en que los productos están normalmente a disposición de los predictores.

Tabla 1.— Tiempos de proceso de los módulos LAM

HH1 = 00, 06, 12 18 horas TU HH2 = 00, 12 horas TU			
<i>Módulos</i>	<i>Inicio</i>	<i>Duración (mín.)</i>	<i>Disponibilidad</i>
Adquisición de datos	HH1 + 2.30	15	HH1 + 2.45
Preprocesamiento	HH1 + 2.45	3	HH1 + 2.48
Análisis	HH1 + 2.48	4	HH1 + 2.52
Verificación	HH1 + 2.52	35	HH1 + 3.27
Postprocesamiento análisis	HH1 + 2.52	3	HH1 + 2.55
Predicción HH1 + 24	HH1 + 2.52	45	HH1 + 3.37
Postprocesamiento de predicciones HH1 + 24	HH1 + 3.37	3	HH1 + 3.40
Predicción HH1 + 48	HH1 + 3.37	45	HH1 + 4.22
Postprocesamiento de predicciones HH1 + 48	HH1 + 4.22	3	HH1 + 4.25
Predicción estadística	HH2 + 8.30	5	HH2 + 8.35
	HH2 + 7.00	5	HH2 + 7.05

Tabla 2.—Archivo de análisis y predicciones procedentes del modelo operativo del INM.*

<i>Tipo</i>	<i>Campos</i>	<i>Niveles</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Hora TU</i>	<i>Inicio período</i>
Análisis	Geopotencial	(1000, 850, 700,	—	00, 12	1986 (jun.)
	Temperatura	500, 400, 300,			
	Comp. <i>u</i> y <i>v</i>	250, 200, 150,		00, 06, 12, 18	1989 (mar.)
	de viento	y 100 mb)			
	Humedad.				
Predicc. LAM	Id.	Id.	06	00, 12	1986 (jun.)
				00, 06, 12, 18	1989 (mar.)
Condiciones contorno de ECMWF	Id.	Id.	06	00	1987 (mar.)
Ventanas modelo LAM	Id.	Id.	06	00, 12	1986 (jun.)
				00, 06, 12, 18	1987 (mar.)
Ventanas modelo LAM	Id.	15 niveles	03	00, 06, 12, 18	1991 (ene.)

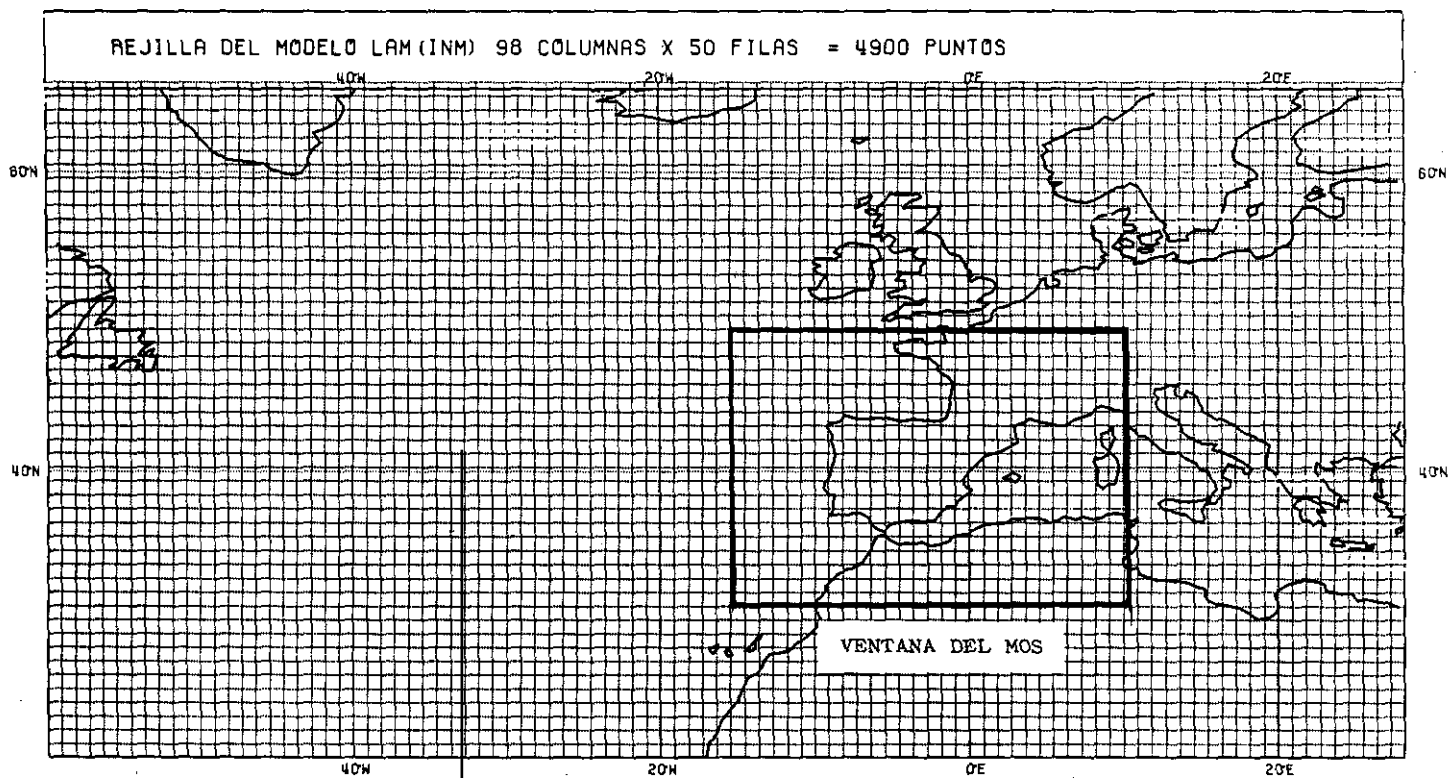


Figura 7.—Rejilla del modelo LAM (INM) 98 columnas×50 filas=4.900 puntos.

Una vez al día se realiza la transferencia al archivo definitivo, en cinta, de los análisis y las predicciones, espaciadas cada seis horas, procedentes de cada uno de los cuatro ciclos de predicciones diarias. Los campos archivados corresponden al área del modelo, y a una ventana del mismo, fig. 7, que permite disponer en un menor número de cintas de la información del modelo en el área de influencia de la Península Ibérica. La Tabla 2 resume las existencias en archivo de los campos asociados al modelo LAM.

El sistema de archivo antes descrito, complementado por el adecuado sistema de recuperación, está diseñado para que facilite los estudios de diagnóstico y verificación del modelo, permita la repetición de predicciones con diferentes versiones del mismo y para que proporcione la base de datos de predictores que se utiliza en un sistema de predicción estadística en base a los resultados del modelo, y que se esboza a continuación.

5. PREDICCIÓN ESTADÍSTICA

La aplicación directa de los valores previstos por el modelo para la predicción de las variables meteorológicas observadas en el suelo (temperatura, precipitación, humedad, viento, etc.) presenta dificultades por las discrepancias que generalmente se presentan, debido a las condiciones locales del lugar y a la dificultad del modelo para resolver eficazmente las escalas pequeñas.

Resulta conveniente, por tanto, disponer de métodos que aproximen los resultados del modelo a la realidad. La predicción estadística contribuye a ello y en el INM se ha elegido, entre las diferentes técnicas probadas, el MOS (model Output Statics), que combina de manera eficiente los resultados del modelo y los datos observados mediante métodos estadísticos, como la regresión selectiva, el análisis discriminante, el análisis factorial, etc. (Glahn, 1982).

El MOS combina como predictandos y predictores las observaciones en las estaciones de la red sinóptica del INM y las predicciones obtenidas de los ciclos de 00 y 12 horas del modelo. La climatología local y los errores sistemáticos del modelo se incorporan así implícitamente a las ecuaciones de regresión, calculadas trimestralmente a partir de la información disponible desde 1986. Diariamente, una vez finalizado el postprocesamiento, se calculan, a partir de dichas ecuaciones, de las últimas observaciones recibidas y de los resultados del modelo, los valores previstos de la temperatura a lo largo del día en cada uno de los observatorios de la red del INM y se ensaya actualmente la aplicabilidad de esta técnica a otras variables meteorológicas (Azcárraga, 1990).

6. REFERENCIAS

- Anthes, R. A. (1977): A cumulus Parametrization Scheme Utilizing a One-Dimensional Cloud Model. *Mon. Wea. Rev.* **105**, 270-286.
- Azcárraga, R. (1990): Sistema para el desarrollo de ecuaciones M.O.S. en el INM. Nota Técnica Interna.
- Bijlsma, S. J. and L. M. Hafkenscheid (1986): Initialization of a Limited Area Model: A Comparison between the Nonlinear Normal Mode and Bounded Derivative Methods. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1445-1455.
- Bjerknes, V. (1904): Weather forecasting as a problem in mechanism and physics *Meteor. Zeitschr.* **21**, 1-7.
- Davies-Källberg, H. C. (1976): A lateral bounded formulations for multilevel prediction models. *Quart. J. R. Met. Soc.* **102**, 405-418.
- Díaz-Pabón, R. (1989): Modelo operativo en el INM de análisis numérico tridimensional de campos meteorológicos. Serv. Publicaciones INM, Madrid.
- Gimeno de Evan, C. (1985): Modelo operativo de predicción numérica del INM. Serv. Publicaciones INM.
- Glahn, R. (1982): Statistical Weather Forecasting. *Seminar Workshop ECMWF*.
- Gustafsson, A. (1979): An Operational Scheme for Three-Dimensional Numerical Analysis of Meteorological Fields. *Internal Report*. SMHI.
- Haseler, J. and D. Burridge (1979): Documentation for the ECMWF Grid Point Model. *Internal Report. n.º 9, Research Dep.*, ECMWF.
- Hortal, M. (1979): Modelo numérico de tres parámetros para predicción del tiempo. *III Asam. Nac. de Geodesia y Geofísica*. Vol. II, 509-522.
- Kuo, H. L. (1974): Further studies of the Parametrization of the Influence of Cumulus Convection on Large-Scale Flow. *J. Atmos. Sci.* **31**, 1232-1240.
- Medina, M. y B. Orfila (1979): Perspectivas de un sistema de predicción a corto y medio plazo en el Servicio de Predicción del INM. *III Asam. Nac. de Geodesia y Geofísica*. Vol. II, 471-488.
- Nordeng, T. E. (1986): Parametrization of Physical Processes in a Three-Dimensional Numerical Weather Prediction Model. *Det. Norske Meteorologiske Institutt*, Technical Report n.º 65.
- Orfila, B.; J. García Rendo y M. Hortal (1979): Sistema numérico de análisis y predicción que se desarrolla en el Servicio de Predicción del INM. *III Asam. Nac. de Geodesia y Geofísica*. Vol. II, 489-508.

Apéndice I.—Ecuaciones del modelo

- $$\begin{aligned}
 1) \quad & \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\cos(\theta)} Z p_s v \cos(\theta) + \frac{1}{a \cos(\theta)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\Phi + E) + \\
 & + RT \frac{1}{a \cos(\theta)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\ln p_s) + \dot{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma} = F_u \\
 2) \quad & \frac{\partial v}{\partial t} + Z p_s u + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} (\Phi + E) + \\
 & + RT \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} (\ln p_s) + \dot{\sigma} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = F_v \\
 3) \quad & \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{p_s} \left[\frac{1}{a \cos(\theta)} \left(p_s u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + p_s v \cos(\theta) \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \right. \\
 & \left. + p_s \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \frac{k T_w}{\sigma} \right] = Q \\
 4) \quad & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{p_s} \left[\frac{1}{a \cos(\theta)} \left(p_s u \frac{\partial q}{\partial \lambda} + p_s v \cos(\theta) \frac{\partial q}{\partial \theta} \right) + p_s \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right] = S \\
 5) \quad & \frac{\partial p_s}{\partial t} = - \int_0^1 \frac{1}{a \cos(\theta)} \left\{ \frac{\partial}{\partial \lambda} (p_s u) + \frac{\partial}{\partial \theta} [p_s v \cos(\theta)] \right\} \partial \sigma \\
 6) \quad & \frac{\partial \Phi}{\partial \ln \sigma} = -RT
 \end{aligned}$$

donde,

$$\sigma = p/p_s \quad \dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad \dot{\sigma}_{\sigma=0} = \dot{\sigma}_{\sigma=1} = 0$$

$$Z = \frac{1}{p_s} \left\{ f + \frac{1}{a \cos(\theta)} \left(\frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial \theta} [u \cos(\theta)] \right) \right\} \quad v.p.a.$$

$$E = \frac{1}{2} \left[u^2 + \frac{1}{\cos(\theta)} v^2 \cos(\theta) \right] \quad e.c.e.$$

$$\omega = \frac{\partial p}{\partial t} \quad f = 2\Omega \sin(\theta) \quad k = R/c_p$$

Apéndice II-a: Verificaciones año 1989

Tabla I.—1000 hPa: Error medio del geopotencial (Dm)

1000 h	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	-1.3	-0.6	-0.4	-0.6	0.2	-0.2	0.6	0.5	-0.2	-0.7	-0.8	
H + 36	-1.4	-0.7	-0.4	-0.7	0.3	-0.3	0.5	0.4	-0.5	-1.1	-1.1	
H + 48	-1.4	-1.0	-0.4	-0.6	0.7	-0.2	0.7	0.7	-0.6	-1.2	-1.2	

Tabla II.—100 hPa: Error cuadrático medio del geopotencial (Dm)

1000 hPa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	1.9	1.9	1.9	1.9	1.5	1.4	2.0	1.9	1.8	1.6	2.2	
H + 36	2.3	2.3	2.3	2.4	1.9	1.8	2.1	2.1	2.1	2.1	2.6	
H + 48	2.5	2.7	2.7	2.8	2.3	2.1	2.4	2.3	2.4	2.4	2.7	

Tabla III.—500 hPa: Error medio del geopotencial (Dm)

500 hPa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	-1.3	-1.5	10.6	-1.6	-1.3	-1.4	-0.8	-0.9	-1.0	-0.9	-0.5	
H + 36	-0.9	-1.4	-0.5	-1.7	-1.3	-1.5	-0.9	-0.8	-1.0	-1.0	-0.6	
H + 48	-0.3	-1.4	-0.3	-1.6	-1.0	-1.7	-0.6	-0.3	-0.8	-0.9	-0.3	

Tabla IV.—500 hPa: Error cuadrático medio del geopotencial (Dm)

500 hPa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	2.2	2.5	2.2	2.5	2.0	2.0	1.7	1.8	1.9	2.0	2.5	
H + 36	2.6	2.9	2.7	3.1	2.3	2.4	2.1	2.0	2.3	2.4	3.0	
H + 48	3.0	3.6	3.3	3.7	2.6	2.8	2.5	2.2	2.8	2.8	3.4	

Tabla V. 850 hPa: Error medio de la temperatura (°C)

850 h	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	0.5	-0.1	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	0.3	0.7	0.5	
H + 36	0.6	-0.2	-0.7	-0.6	-0.7	-1.6	-0.6	-0.4	0.2	0.6	0.4	
H + 48	0.7	-0.3	-0.9	-0.8	-1.0	-1.0	-0.9	-0.5	-0.2	0.6	0.6	

Apéndice II-b: Verificaciones año 1989

Tabla VI.—850 hPa: Error cuadrático medio de la temperatura (°C)

850 hPa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	1.8	3.0	2.1	1.9	1.9	1.8	2.1	2.0	1.9	1.9	2.2	
H + 36	2.0	3.0	2.5	2.3	2.4	2.2	2.6	2.3	2.1	2.1	2.4	
H + 48	2.2	3.0	2.8	2.5	2.8	2.6	2.9	2.5	2.3	2.3	2.4	

Tabla VII.—500 hPa: Error medio de la temperatura (°C)

500 hPa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	1.6	1.4	1.4	1.1	1.3	1.5	1.5	1.7	1.6	1.4	0.6	
H + 36	1.8	1.5	1.5	1.2	1.4	1.6	1.7	1.8	1.7	1.5	0.6	
H + 48	2.1	1.7	1.6	1.2	1.5	1.6	1.8	2.0	1.8	1.6	0.7	

Tabla IX.—850 hPa: Error cuadrático medio del vector viento (m/s)

850 hPa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	4.9	5.4	5.7	6.0	4.8	4.7	4.8	4.8	5.1	5.3	5.4	
H + 36	5.2	5.9	6.1	6.6	5.2	5.2	5.0	5.2	5.6	5.6	5.9	
H + 48	5.7	6.4	6.6	7.2	5.5	5.5	5.4	5.5	6.1	6.0	6.3	

Tabla X. 200 hPa: Error cuadrático medio del vector viento (m/s)

200 hPa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	8.4	8.1	7.9	8.1	7.0	7.3	7.6	8.5	8.7	9.2	9.9	
H + 36	9.7	8.9	8.9	9.1	7.9	8.3	8.9	8.7	10.1	10.2	10.6	
H + 48	11.0	9.8	9.8	10.2	8.7	9.2	10.1	11.0	12.1	11.3	11.0	

Tabla XI.—850 hPa: Error medio de la humedad relativa (%)

850 hPa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	-8	-5	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-6	-6	-3	
H + 36	-8	-4	-2	-3	-4	-5	-5	-7	-6	-7	-2	
H + 48	-8	-4	-1	-3	-3	-5	-5	-7	-6	-6	-2	

Tabla XII.—850 hPa: Error cuadrático medio de la humedad relativa (%)

850 hPa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H + 24	20	18	18	21	17	17	15	8.5	8.7	9.2	9.9	
H + 36	21	19	19	22	19	19	17	19	20	21	20	
H + 48	23	19	20	24	20	21	18	20	22	22	19	